

## Оценка влияния высоты и взаимного расположения составных элементов опорной изоляции на ее электрическую прочность

КОРЯВИН А.Р., ВОЛКОВА О.В.

ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия

*Приведены результаты исследований влияния высоты и взаимного расположения составных элементов опорной изоляции классов сверхвысокого напряжения на ее электрическую прочность при воздействии коммутационных импульсов положительной полярности, при которых определяются минимально допустимые габариты изоляции. Показано, что наибольшие значения разрядного напряжения изоляции достигаются при формировании лидерного разряда по чисто воздушным траекториям: экран-подножник или экран-плоскость. Аналогичный результат обеспечивается в случае каскадных перекрытий по элементам колонки с экрана, если строительная высота верхнего изолятора существенно больше, чем нижнего. Обратное взаимное расположение этих изоляторов приводит к резкому падению разрядного напряжения при каскадных перекрытиях. Показано, что в момент образования сквозной фазы основной вклад в величину разрядного напряжения изоляции вносит падение напряжения в положительных стримерах, которое прямо пропорционально длине этих стримеров. Отсюда следует, что основной причиной неоднозначного влияния высоты и взаимного расположения составных элементов опорной изоляции на ее электрическую прочность при каскадных перекрытиях является существенное различие в длине положительных стримерных зон в начале сквозной фазы. Если при высоте верхнего изолятора 2,7 м протяженность положительных стримеров в этот момент сопоставима с длиной стримеров при развитии разряда по чисто воздушным траекториям, то практически двойное сокращение высоты верхнего изолятора сопровождается резким уменьшением длины стримеров. Предложены меры по устранению нежелательных каскадных перекрытий и обеспечению наибольшей электрической прочности опорной изоляции.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: опорная изоляция, каскадные перекрытия, электрическая прочность, коммутационный импульс положительной полярности*

Опорные изоляционные конструкции являются составной частью большинства видов электрооборудования сверхвысокого напряжения (СВН), к которому относятся: коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы тока и напряжения, вентильные разрядники и ограничители перенапряжений, конденсаторы связи, шинные опоры.

При проектировании опорной изоляции (ОИ) основное требование состоит в обеспечении надежной ее работы в эксплуатации [1]. Эффективной мерой реализации этого требования является достижение высокого уровня электрической прочности ОИ при воздействии стандартного коммутационного импульса 250/2500 мкс положительной полярности, при котором габариты изоляции СВН принимают минимально допустимые значения.

Известными мерами повышения электрической прочности ОИ являются [2, 3]:

оснащение ОИ тороидальным экраном, позволяющим выравнять распределение напряжения вдоль конструкции;

расположение экрана на оптимальном уровне относительно нижней поверхности верхнего фланца ОИ

с целью предотвращения каскадных перекрытий (перекрытий каждого элемента конструкции), формирующихся с этого фланца, что сопровождается снижением разрядных напряжений.

Однако указанные меры не всегда приводят к желаемому результату. Существуют три возможных типа траектории разрядов, формирующихся с экрана:

по чисто воздушному пути: экран – заземленный подножник опорной изоляции;

по чисто воздушному пути: экран – заземленная плоскость;

каскадно (с экрана на нижний фланец верхнего элемента и далее, перекрывая каждый нижерасположенный элемент колонки).

Первым двум типам траектории разрядов соответствует наибольшая электрическая прочность ОИ.

Относительно небольшое количество экспериментальных данных свидетельствует о неоднозначном влиянии каскадных перекрытий с экрана (КПЭ) на электрическую прочность ОИ. В одних случаях такие перекрытия сопровождаются заметным снижением разрядного напряжения  $U_p$ , а в других значения  $U_p$  остаются на высоком уровне.

Цель работы состояла в изучении влияния КПЭ на разрядные напряжения ОИ и разработке мер по устранению перекрытий, приводящих к снижению электрической прочности изоляции.

Для исследований выбирались опорные изоляционные конструкции со строительной высотой  $H_{стр}$  порядка 4 м и более, что соответствует внешней изоляции класса напряжения не менее 500 кВ. Для оценки влияния высоты элементов ОИ и их взаимного расположения в колонке использовались конструкции с разной строительной высотой изоляторов (рис. 1). Для предотвращения появления каскадных перекрытий с верхнего фланца колонки конструкции (рис. 1) осна-

щались тороидальным экраном, для которого согласно [2, 3] отношение диаметра тороида  $d_3$  к строительной высоте опорной изоляции  $H_{стр}$  должно быть не менее 0,2. Этому требованию удовлетворяли экраны  $\varnothing 1$  и  $2$  м, которые использовались в экспериментах.

Расчеты, выполненные по программе AXIAL [4], показали, что для существенного снижения напряженности поля на верхнем фланце колонки и предотвращения каскадных перекрытий с этого фланца экран  $\varnothing 1$  м должен располагаться ниже нижней поверхности этого фланца на 7 см (рис. 2).

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

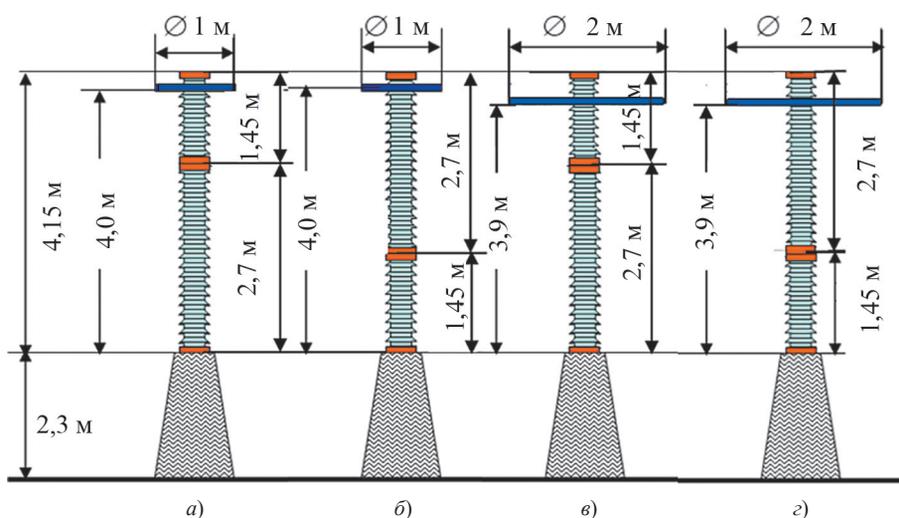


Рис. 1. Эскизы исследуемых опорных изоляционных конструкций с подножником высотой 2,3 м  
 Fig. 1. Sketches of the studied supporting insulation constructions with a 2.3 m high pedestal

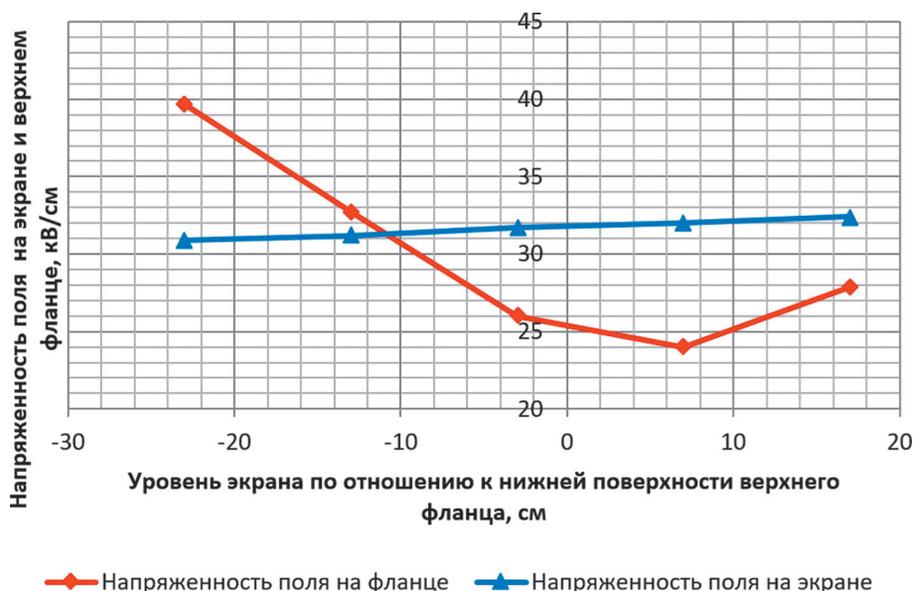
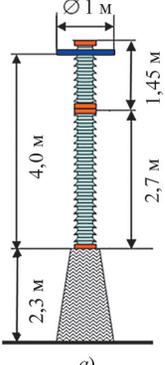
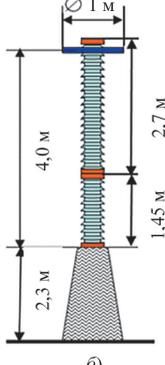
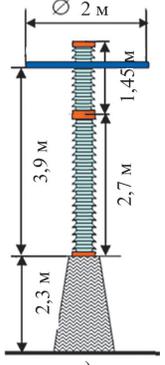
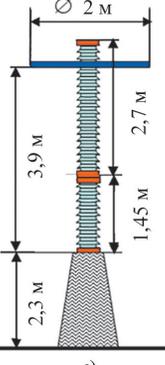


Рис. 2. Начальная напряженность поля на экране диаметром 1 м и верхнем фланце ОИ в зависимости от уровня расположения экрана по отношению к нижней поверхности верхнего фланца  
 Fig. 2. The initial field strength on the screen with a diameter of 1 m and the upper flange of the SI, depending on the level of the screen location in relation to the lower surface of the upper flange

Таблица 1

50%-е ( $U_{50}$ ) и минимальные  $U_{p, \min}$  разрядные напряжения опорных изоляционных конструкций при коммутационном импульсе 250/2500 мкс положительной полярности

50% ( $U_{50}$ ) and minimum  $U_{p, \min}$  discharge voltages of the supporting insulation structures at a switching pulse of 250/2500  $\mu$ s of positive polarity

+250/2500 мкс							
	$U_{50}$ , кВ	$U_{p, \min}$ , кВ	Тип траектории разряда		$U_{50}$ , кВ	$U_{p, \min}$ , кВ	Тип траектории разряда
	1440		1230		Э-подн. – 79%	1510	
			Э-пл. – 13%				Э-пл. – 0%
			КПЭ – 8%		1290		КПЭ – 37%
	$U_{50}$ , кВ	$U_{p, \min}$ , кВ	Тип траектории разряда		$U_{50}$ , кВ	$U_{p, \min}$ , кВ	Тип траектории разряда
	1480		1240		Э-подн. – 75%	1520	
			Э-пл. – 25%				Э-пл. – 21%
			КПЭ – 0%				КПЭ – 0%

В отличие от грозовых воздействий характерной особенностью феноменологии разряда при коммутационных импульсах положительной полярности является большой разброс траекторий лидерного канала со значительным удалением периферийных разрядов от вертикальной оси конструкции. Именно эти импульсы используются в лабораторных исследованиях молниезащиты [5–7].

Вторая отличительная черта разрядного процесса состоит в завершении разряда только на фронте импульсного напряжения (предразрядное время  $T_p$  не превосходит длительности фронта  $T_\phi$ ) [8–11]. При воздействии импульсов 250/2500 мкс положительной полярности лидерный канал продвигается с постоянной скоростью 1,5 см/мкс по извилистой траектории преимущественно вдоль силовых линий поля, подавляющая часть которых располагается вдали от оси конструкции, а меньшая часть – ближе к этой оси. Именно эта часть траекторий ответственна за появление каскадных перекрытий с экрана (КПЭ) на нижний фланец верхнего изолятора и далее – на нижний фланец нижнего изолятора.

В общем случае КПЭ является следствием существенного усиления напряженности поля на нижнем

фланце верхнего элемента  $E_{n, \text{фл}}$  до значений, достаточных для ориентировки головки нисходящего лидера к этому фланцу. Усиление  $E_{n, \text{фл}}$  осуществляется за счет действия положительного объемного заряда стримерной зоны, сосредоточенного на ее границе (рис. 3).

При небольшой высоте верхнего элемента (рис. 3,а) в процессе формирования КПЭ длина лидера, протяженность его стримерной зоны и величина объемного заряда достигают относительно небольших значений. То же самое относится к зонам разброса лидерного канала и его стримеров. Совокупность этих факторов приводит к тому, что каскадные перекрытия составляют лишь небольшую часть разрядного пути (в рассматриваемом случае 8%), в то время как большая часть разрядов формируется по траекториям экран-подножник и экран-плоскость (табл. 1).

Для конструкции рис. 1,а начальному моменту формирования КПЭ  $T_{\text{КП}(1)}$  соответствует относительно невысокое напряжение на высоковольтном электроде  $U_{\text{КП}(1)}$ , и для завершения разряда требуется также относительно небольшой подъем напряжения  $\Delta U_1$  в течение времени  $\Delta T_1$ . В результате разрядное напряжение в этом случае  $U_{p1}$  будет минимальным:

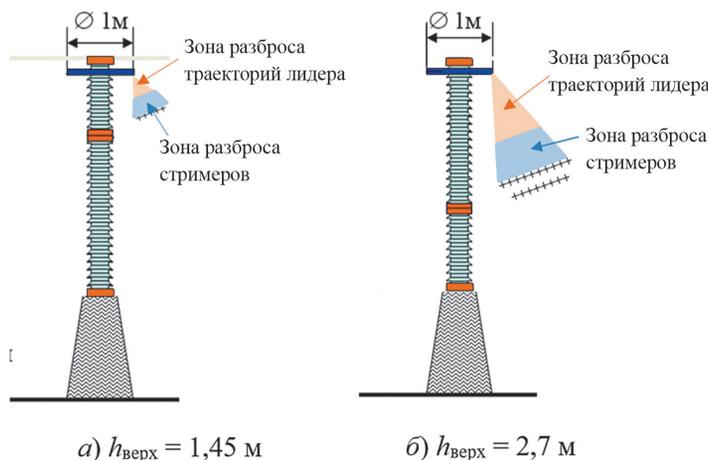


Рис. 3. Иллюстрация вероятности возникновения каскадного перекрытия колонок с разновысокими изоляторами в верхней части конструкции  
 Fig. 3. An illustration of the cascade overlap probability of columns with different-high insulators in the construction's upper part

$$U_{pКП(1)} = U_{КП(1)} + \Delta U_1 = U_{p,мин(1)}$$

а предразрядное время  $T_{p(1)} = T_{КП(1)} + \Delta T_1$ . Согласно опытным данным табл. 1  $U_{pКП(1)} = 1120$  кВ.

Сказанное иллюстрируется рис. 4. Подавляющую же часть траекторий составляют периферийные разряды (экран-подножник и экран-плоскость), которым соответствует минимальное разрядное напряжение  $U_{p,мин(2)} = 1230$  кВ. Как видно из рис. 4, в этом случае начальный момент времени формирования разряда по пути экран-подножник  $T_{э-подн}$  может быть близок к соответствующему времени ( $T_{КП(1)}$ ). Однако остальные параметры заметно возрастают: время развития лидера  $\Delta T_2$  от  $T_{э-подн}$  до полного завершения разряда  $T_{p(2)}$ , под-

ем напряжения в течение времени  $\Delta T_2$  ( $\Delta U_2$ ) и значение минимального разрядного напряжения  $U_{p,мин(2)} = 1230$  кВ.

Почти двукратное увеличение высоты верхнего элемента конструкции (рис. 1,б) сопровождается существенным изменением в картине каскадного перекрытия. Прежде всего, резко увеличивается число КПЭ (37 %). Казалось бы, что при этом должна снизиться и прочность колонки. В действительности же по сравнению с колонкой (рис. 1,а) значение 50 %-го разрядного напряжения  $U_{50}$  возросло и составило 1510 кВ, а минимальные разрядные напряжения  $U_{p,мин}$  оказались практически независимыми от траектории перекрытия (с экрана и далее чисто по воздушному пути

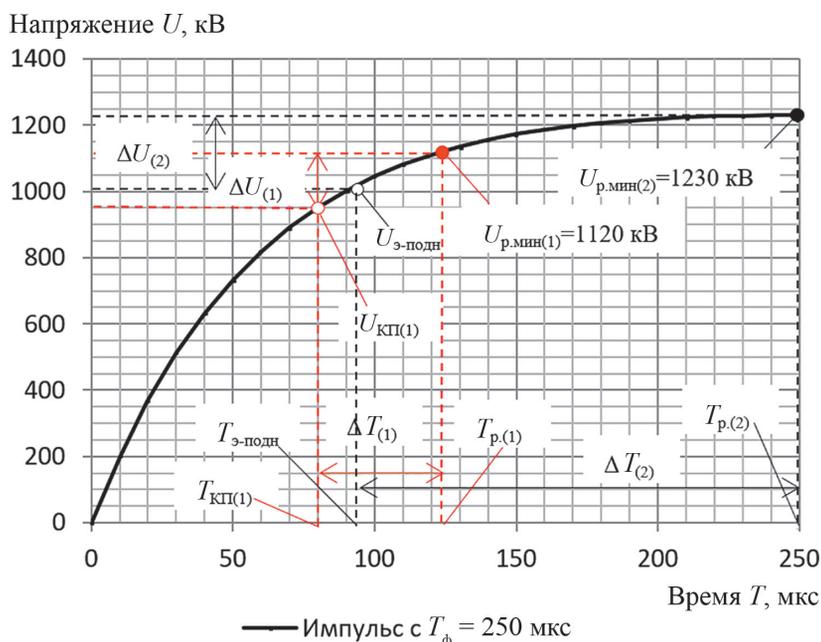


Рис. 4. Стилизованная осциллограмма импульса напряжения с длительностью фронта 250 мкс при каскадных и некаскадных перекрытиях изоляционной колонки с верхним изолятором высотой  $h_{верх} = 1,45$  м и экраном  $\phi 1$  м

Fig. 4. Stylized oscillogram of a voltage impulse with a front duration of 250 μs with cascading and non-cascading overlaps of an insulating column with an upper insulator with a height  $h = 1.45$  m and a screen  $\phi 1$  m

( $U_{p, \min} = 1280$  кВ) или каскадно вдоль конструкции ( $U_{p, \min} = 1290$  кВ)).

Как видно из рис. 3, б, при относительно большой высоте верхнего элемента в процессе формирования КПЭ длина лидера, протяженность его стримеров, величина объемного заряда, зоны разброса лидерного канала и его стримеров достигают существенно больших значений. Соответственно возрастает часть траекторий, расположенных ближе к оси конструкции и, следовательно, увеличивается вероятность появления каскадных перекрытий.

Для подтверждения правомерности проведенного качественного анализа выполним упрощенные количественные оценки. В классической работе [12] было показано, что для несимметричных воздушных промежутков длиной  $S$  (для которых размеры анода меньше размеров заземленного электрода) с сильной степенью неоднородности электрического поля *начальные коронные и лидерные явления практически не влияют на значение разрядного напряжения  $U_p$* . Этот важнейший вывод использовался затем в [13, 14] при разработке инженерных методов расчета электрической прочности внешней изоляции.

Наибольший интерес в картине разрядного процесса представляет момент его перехода в сквозную фазу  $T_{c, \phi}$ , когда стримеры положительного лидера достигают противоположного заземленного электрода. В этот момент напряжение на промежутке практически совпадает с разрядным ( $U_{c, \phi} \approx U_p$ ), а время  $T_{c, \phi}$  – с предразрядным значением  $T_p$ . Этот факт позволил составить уравнение баланса напряжений в момент перехода разряда в сквозную фазу [12]:

$$U_p = E_l L_l + E_{c+} L_{c+} = E_l (S - L_{c+}) + E_{c+} L_{c+}, \quad (1)$$

где  $E_l$  и  $E_{c+}$  – средняя напряженность электрического поля в канале лидера и его стримерной зоне;  $L_l$  и  $L_{c+}$  – длина лидерного канала и его стримерной зоны в начале сквозной фазы.

Согласно табл. 1 для конструкции рис. 1, а при каскадных перекрытиях минимальное разрядное напряжение  $U_{p, \min(1)} = 1120$  кВ. В первом приближении можно не учитывать встречную отрицательную составляющую стримерной зоны в начале сквозной фазы. Тогда, используя (1), оценим протяженность лидера и его положительной стримерной зоны в момент образования сквозной фазы.

По данным [12–14] средняя напряженность поля в положительных стримерах остается неизменной и составляет  $E_{c+} = 4,5$  кВ/см, а средние градиенты напряжения в лидерном канале задаются выражением [14]:

$$E_l = \frac{4,5}{1 + 0,076 L_l^{0,65}} \text{ (кВ/см, см)}. \quad (2)$$

Длина каскадного разряда  $S_p$  состоит из двух отрезков (рис. 5, а):  $S_1$  длиной 124,6 см (длина промежутка экран  $\varnothing 1$  м – нижний фланец верхнего изолятора) и  $S_2$  длиной 254 см (высота нижнего изолятора без учета высоты его фланцев). Общая длина каскадного разряда  $S_p = 378,6$  см. При таком  $S_p$  уравнение баланса напряжений примет вид:

$$\begin{aligned} U_{p, \min(1)} &= \frac{4,5}{1 + 0,076^{0,65}} L_l + 4,5 L_{c+} = \\ &= \frac{4,5}{1 + 0,076^{0,65}} (378,6 - L_{c+}) + 4,5 L_{c+} = 1120 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты решения (3) представлены в табл. 2.

Проведем аналогичные расчеты для той же конструкции ( $h_{\text{верх}} = 1,45$  м, экран  $\varnothing 1$  м) при траектории разряда экран-подножник ( $S_p = 400$  см). В этом случае минимальное разрядное напряжение  $U_{p, \min(2)}$  составляет 1230 кВ (см. табл. 1 и рис. 1, а).

При  $S_p = 400$  см уравнение баланса напряжений запишется как

$$\begin{aligned} U_{p, \min(2)} &= \frac{4,5}{1 + 0,076^{0,65}} L_l + 4,5 L_{c+} = \\ &= \frac{4,5}{1 + 0,076^{0,65}} (400 - L_{c+}) + 4,5 L_{c+} = 1230 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты расчетов по (4) представлены в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 видно, что в обоих случаях падение напряжения в каналах лидера  $\Delta U_l$  близки и существенно меньше падения напряжения в стримерной зоне  $\Delta U_{c+}$ . Поэтому  $\Delta U_{c+}$  вносит основной вклад в величину разрядного напряжения. Например, согласно данным табл. 2 и 3 длина стримерной зоны в начале сквозной фазы  $\Delta U_{c+}$  при траектории разряда экран-подножник составляет 217 см, что на 25,1 см больше, чем при каскадных перекрытиях. Таким образом, при малой высоте верхнего элемента имеется явная зависимость разрядного напряжения конструкции от типа перекрытия.

Таблица 2

**Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при каскадном перекрытии конструкции (рис 1,а) с  $U_{p, \min(1)} = 1120$  кВ**  
**The results of calculating the length of the leader and its streamer zone at the beginning of the through phase with cascading overlap of the structure (Fig. 1,а) with  $U_{p, \min(1)} = 1120$  кВ**

$L_l$ , см	$E_l$ , кВ/см	$\Delta U_l$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_l + L_{c+})$ , см	$U_{p, \min(1)}$ , кВ
186,7	1,37	256	191,9	864	378,6	1120

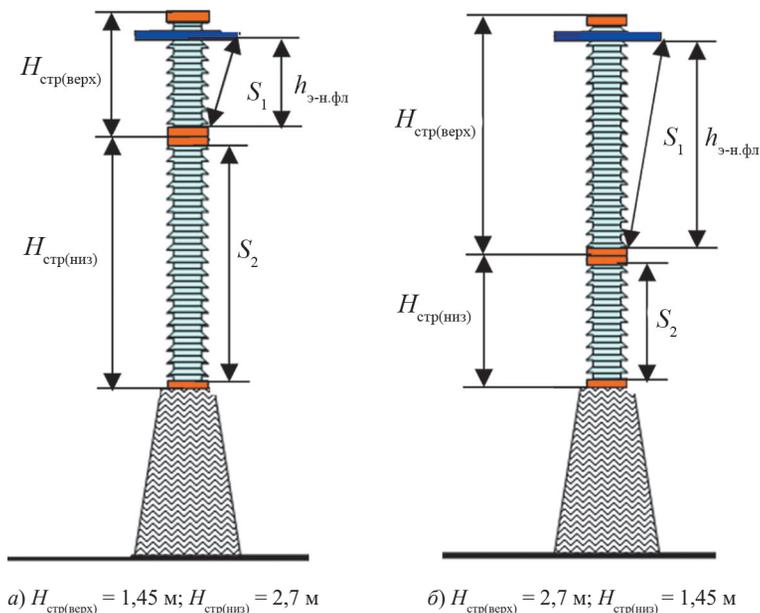


Рис. 5. К определению длины каскадного разряда  $S_p$   
 Fig. 5. To determine the length of the cascade discharge  $S_p$

Таблица 3

Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при перекрытии конструкции (рис 1,а) по траектории экран-подножник с  $U_{р.мин(2)} = 1230$  кВ

The results of calculating the length of the leader and his streamer zone at the beginning of the through phase when the structure is overlapped (Fig. 1,a) along the trajectory of the screen-footboard with a  $U_{р.мин(2)} = 1230$  kV

$L_d$ , см	$E_d$ , кВ/см	$\Delta U_d$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_d + L_{c+})$ , см	$U_{р.мин(2)}$ , кВ
183	1,39	254	217	976	400	1230

Проведем подобный анализ взаимосвязи линейных параметров каскадного разряда в начале сквозной фазы с минимальной величиной разрядного напряжения колонки ( $U_{р.мин(1)} = 1290$  кВ) с верхним изолятором высотой 2,7 м и экраном  $\varnothing$  1 м (табл. 1 и рис. 1,б).

Длина каскадного разряда  $S_p$  состоит из двух отрезков (рис. 5,б):  $S_1$  длиной 248,3 см (длина промежутка экран  $\varnothing$  1 м – нижний фланец верхнего изолятора) и  $S_2$  длиной 129 см (высота нижнего изолятора без учета высоты его фланцев). Общая длина каскадного разряда  $S_p = 377,3$  см. Для рассматриваемого случая справедливо уравнение баланса напряжений

$$U_{р.мин(1)} = \frac{4,5}{1+0,076^{0,65}}(377,3 - L_{c+}) + 4,5L_{c+} = 1290 \text{ кВ. (5)}$$

Результаты расчетов по (5) приведены в табл. 4.

Для той же конструкции при траектории разряда экран-подножник ( $S_p = 400$  см) минимальное разрядное напряжение  $U_{р.мин(2)} = 1280$  кВ (табл. 1 и рис. 1,б).

При  $S_p = 400$  см уравнение баланса напряжений запишется:

$$U_{р.мин(2)} = \frac{4,5}{1+0,076^{0,65}}(400 - L_{c+}) + 4,5L_{c+} = 1280 \text{ кВ. (6)}$$

Результаты расчетов по (6) приведены в табл. 5.

Из данных табл. 4 и 5 видно, что в обоих случаях близким значениям разрядных напряжений ( $U_{р.мин(1)} \approx U_{р.мин(2)}$ ) соответствуют близкие длины стримерных зон  $L_{c+}$  в начале сквозной фазы. Отсюда следует, что увеличение высоты верхнего изолятора способствует росту электрической прочности изоляционной колонки и практическому отсутствию влияния типа перекрытия на величину разрядного напряжения.

На рис. 6 и 7 приведено графическое представление материала табл. 2–5 в виде зависимостей минимального разрядного напряжения  $U_{р.мин}$  и минимальной разрядной напряженности по длине траекторий разряда  $E_{р.мин}$  от отношения длины стримерной зоны в начале сквозной фазы  $L_{c+}$  к длине разрядного пути  $S_p = L_d + L_{c+}$ .

Из рис. 6 и 7 видно, что данные табл. 2–5 хорошо описываются эмпирическими выражениями:

$$U_{р.мин} = -5050 + 20844 \frac{L_{c+}}{S_p} - 17108 \left( \frac{L_{c+}}{S_p} \right)^2; \quad (7)$$

$$E_{р.мин} = 1,97 + 0,562 \frac{L_{c+}}{S_p} + 2,74 \left( \frac{L_{c+}}{S_p} \right)^2. \quad (8)$$

Таблица 4

Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при каскадном перекрытии конструкции (рис 1,б) с  $U_{р.мин(1)} = 1290$  кВ

The results of calculating the length of the leader and its streamer zone at the beginning of the through phase with cascade overlap of the structure (Fig. 1, б) with the  $U_{р.мин(1)} = 1290$  кВ

$L_d$ , см	$E_d$ , кВ/см	$\Delta U_d$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_d + L_{c+})$ , см	$U_{р.мин(1)}$ , кВ
138,9	1,56	217	238,4	1073	377,3	1290

Таблица 5

Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при перекрытии конструкции (рис 1,б) по траектории экран-подножник с  $U_{р.мин(2)} = 1280$  кВ

The results of calculating the length of the leader and his streamer zone at the beginning of the through phase when the structure is overlapped (Fig. 1,б) along the trajectory of the screen-footboard with the  $U_{р.мин(2)} = 1280$  кВ

$L_d$ , см	$E_d$ , кВ/см	$\Delta U_d$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_d + L_{c+})$ , см	$U_{р.мин(2)}$ , кВ
169,6	1,43	243	230,4	1037	400	1280

Кривые рис. 6 и 7 позволяют оценивать электрическую прочность опорной изоляции с экраном  $\varnothing 1$  м при разных соотношениях высоты верхнего и нижнего элементов колонки. В частности, представляет интерес вариант конструкции строительной высотой  $H_{стр} = 415$  см, состоящей из двух изоляторов одинаковой строительной высоты  $H_{стр(верх)} = H_{стр(низ)} = 207,5$  см (экран диаметром 1 м).

В рассматриваемом случае длина каскадного разряда  $S_p$  состоит из двух отрезков:  $S_1$  длиной 186,3 см (длина промежутка экран  $\varnothing 1$  м – нижний фланец верхнего изолятора) и  $S_2$  длиной 191,5 см (высота нижнего изолятора без учета высоты его фланцев). Общая длина каскадного разряда  $S_p = 377,8$  см.

Поскольку отношение  $U_{р.мин}/E_{р.мин} = S_p$ , то при известном  $S_p = 377,8$  см, разделив (7) на (8), получим

значение отношения длины стримерной зоны к длине разрядного пути  $L_{c+}/S_p \approx 0,631$ .

В этом случае уравнение баланса напряжений примет вид:

$$U_{р.мин} = E_d 0,369 S_p + 4,5 \cdot 0,631 S_p = \frac{4,5}{1 + 0,076 \cdot 139,4^{0,65}} 139,4 + 4,5 \cdot 238,4 = 1291 \text{ кВ.} \quad (9)$$

Результаты расчетов по (9) приведены в табл. 6.

Таким образом, использование в конструкции одинаковых изоляторов со строительной высотой  $H_{стр} = 2$  м позволяет получить наибольшую электрическую прочность опорной колонки. В то же время конструкции, составленные из изоляторов относительно небольшой высоты, обладают заметно меньшими минимальными

Минимальное разрядное напряжение  $U_{р.мин}$ , кВ

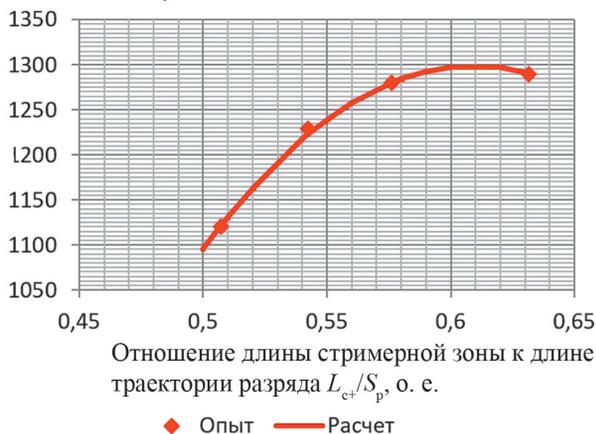


Рис. 6. Зависимость минимального разрядного напряжения изоляционных конструкций по рис. 1 от отношения длины стримерной зоны в начале сквозной фазы к длине разрядного пути

Fig. 6. The dependence of the minimum discharge voltage of insulation constructions according to Fig. 1 on the ratio of the length of the streamer zone at the beginning of the final jump to the length of the discharge path

Минимальная разрядная напряженность  $E_{р.мин}$ , кВ/см

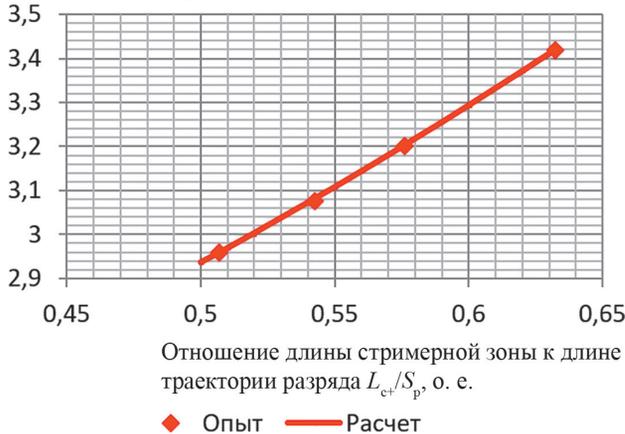


Рис. 7. Зависимость минимальной разрядной напряженности изоляционных конструкций (рис. 1) от отношения длины стримерной зоны в начале сквозной фазы к длине разрядного пути

Fig. 7 The dependence of the minimum discharge strength of insulation constructions (Fig. 1) on the ratio of the length of the streamer zone at the beginning of the finale jump to the length of the discharge path

Таблица 6

**Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при каскадном перекрытии конструкции из двух изоляторов одинаковой  $H_{стр}$**

**The results of calculating the length of the leader and its streamer zone at the beginning of the through phase with cascading overlap of a structure of two insulators of the same height  $H_{стр}$**

$L_d$ , см	$E_d$ , кВ/см	$\Delta U_d$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_d + L_{c+})$ , см	$U_{р.мин(1)}$ , кВ
139,4	1,56	218	238,4	1073	377,8	1291

разрядными напряжениями. Так, согласно опытным данным для колонки с экраном  $\varnothing 1$  м, составленной из четырех изоляторов со строительной высотой каждый  $H_{стр(1-4)} = 130$  см, опытное значение  $U_{р.мин}$  оказалось равным 1150 кВ.

В этом случае длина каскадного разряда  $S_p$  состоит из четырех отрезков:  $S_1 = 118,9$  см (длина промежутка экран  $\varnothing 1$  м – нижний фланец верхнего изолятора) и трех отрезков  $S_2 = 114$  см каждый (изоляция часть остальных трех изоляторов – итого  $S_2 = 342$  см). Длина разрядного пути  $S_p = 460,9$  см. При таком  $S_p$  уравнение баланса напряжений примет вид:

$$U_{р.мин(1)} = E_d L_d + E_{c+} L_{c+} = E_d (460,9 - L_{c+}) + 4,5 L_{c+} = 1150 \text{ кВ.} \quad (10)$$

Результаты расчетов по (10) приведены в табл. 7.

В качестве иллюстрации расчетных данных табл. 6 и 7 на рис. 8 и 9 представлены электронно-оптические развертки разрядного процесса (эпограммы), полу-

ченные при исследовании конструкций с изоляторами относительно большой (рис. 8) и небольшой (рис. 9) высоты.

Из рис. 8 видно, что при разряде с экрана на подножник и при каскадном перекрытии колонки с равновысокими изоляторами большой высоты стримерные зоны имеют довольно большую протяженность, что обеспечивает высокие значения разрядного напряжения. Причем во втором случае длина стримеров оказалась больше, чем при разряде чисто по воздуху. В результате при каскадных перекрытиях разрядное напряжение оказывается несколько выше (1640 против 1580 кВ).

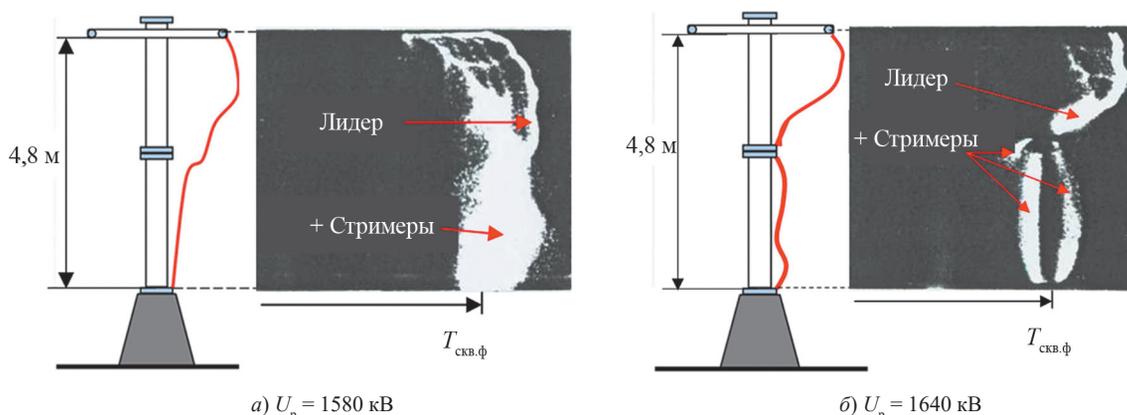
Резкое сокращение высоты изоляторов приводит к существенному изменению феноменологии разряда. При разряде с экрана на подножник разрядное напряжение составляет 1450 кВ, а длина стримерной зоны в начале сквозной фазы превышает половину разрядного пути  $S_p = 470$  см (рис. 9,а). В результате решения уравнения баланса напряжений длина стримерной зоны

Таблица 7

**Результаты расчета длины лидера и его стримерной зоны в начале сквозной фазы при каскадном перекрытии конструкции из четырех изоляторов с  $H_{стр} = 1,3$  м,  $U_{р.мин(1)} = 1150$  кВ**

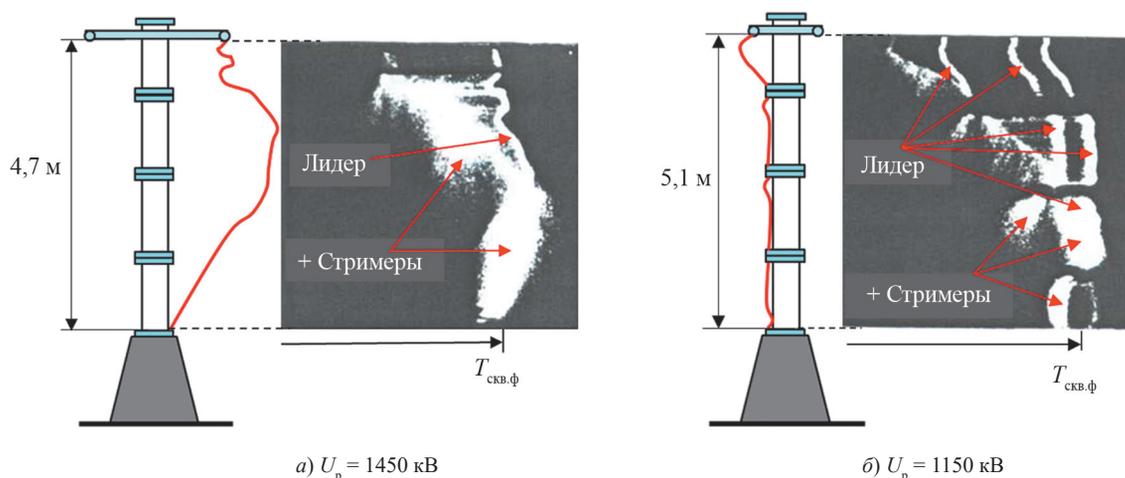
**The results of calculating the length of the leader and its streamer zone at the beginning of the through phase with structure cascading overlap of four insulators with the  $H_{стр} = 1.3$  m,  $U_{р.мин(1)} = 1150$  kV**

$L_d$ , см	$E_d$ , кВ/см	$\Delta U_d$ , кВ	$L_{c+}$ , см	$\Delta U_{c+}$ , кВ	$(L_d + L_{c+})$ , см	$U_{р.мин(2)}$ , кВ
275,4	1,144	315,3	185,5	834,7	460,9	1150



**Рис. 8.** Стилизованное представление опорной изоляции с изоляторами большой высоты с траекторией разряда экран-подножник (а) и каскадно с экрана (б) и электронно-оптические развертки разряда при коммутационном импульсе 250/2500 мкс положительной полярности

**Fig. 8.** A stylized representation of the support insulation with big high insulators with a screen-pedestal discharge trajectory (a) and cascaded from the screen (b) and electron-optical scans of the discharge at a switching pulse of 250/2500 microseconds of positive polarity



**Рис. 9.** Стилизованное представление опорной изоляции с изоляторами небольшой высоты с траекторией разряда экран-подножник (а) и каскадно с экрана (б) и электронно-оптические развертки разряда при коммутационном импульсе 250/2500 мкс положительной полярности

**Fig. 9.** Stylized representation of the support insulation with insulators of small height with a discharge path of the shield-footboard (a) and cascaded from the screen (b) and electron-optical scans of the discharge at a switching pulse of 250/2500 microseconds of positive polarity

в начале сквозной фазы  $L_{c+}$  оказалась равной 262 см ( $L_{c+}/S_p = 0,56S_p$ ).

При каскадном перекрытии каждого изолятора протяженность стримеров оказывается менее половины высоты изоляционной части перекрываемых изоляторов. Перекрытие верхнего и каждого ниже расположенных элементов сопровождается яркой вспышкой лидерных каналов и увеличением длины стримерной зоны (рис. 9,б). Из табл. 7 видно, что в этом случае при длине разрядного пути  $S_p = 460,9$  см протяженность стримерной зоны  $L_{c+} = 185,5$  см ( $L_{c+}/S_p = 0,4S_p$ ), а разрядное напряжение  $U_{p,мин} = 1150$  кВ, что много меньше, чем для конструкции по рис. 9,а.

Для конструкций (рис. 1) с разновысокими верхними изоляторами увеличение диаметра экрана с 1 до 2 м приводит к полному устранению каскадных перекрытий (табл. 1). При этом наблюдается небольшое увеличение как 50 %-го, так и минимального разрядного напряжения.

**Выводы.** При воздействии стандартного коммутационного импульса 250/2500 мкс положительной полярности наибольшая электрическая прочность экранированной опорной изоляции сверхвысокого напряжения обеспечивается при формировании лидерного разряда по чисто воздушному пути: экран-подножник или экран-плоскость. В этом случае протяженность положительных стримеров в начале сквозной фазы и падение напряжения на ней, а следовательно и величина разрядного напряжения, достигают своих наибольших значений.

При каскадных перекрытиях с экрана по элементам опорной изоляции ее электрическая прочность зависит от высоты и взаимного расположения составляющих ее изоляторов. Каскадные перекрытия изоляционных конструкций, состоящих из одинаковых изоляторов относительно небольшой высоты, сопровождаются резким снижением разрядных напряжений. Аналогичное заключение справедливо и для разновысоких

элементов колонки при небольшой высоте верхнего изолятора. Низким значениям разрядного напряжения соответствует и относительно небольшая длина положительной стримерной зоны в начале сквозной фазы.

Почти двукратное увеличение высоты верхнего элемента приводит к заметному росту разрядных напряжений при каскадных перекрытиях и практическому их равенству разрядным напряжениям, соответствующим траекториям разряда по чисто воздушному пути.

Для обеспечения высокой электрической прочности опорной изоляции класса напряжения 500 кВ и выше целесообразно использовать одинаковые изоляторы строительной высотой порядка 2 м и более. Современный уровень технологии позволяет изготавливать фарфоровые и полимерные изоляторы такой высоты без особых затруднений. При этом отношение диаметра тороидального экрана к строительной высоте колонки  $\phi_3/H_{стр}$  должно быть не менее 0,25. В случае необходимости применения разновысоких изоляторов высота нижнего элемента должна быть не менее 1,5 м. Двойное увеличение отношения  $\phi_3/H_{стр}$  способствует полному устранению каскадных перекрытий и достижению наибольшей электрической прочности опорной изоляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52034-2008. Изоляторы керамические опорные на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2009, 28 с.
2. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1984, 208 с.
3. Слущкин Л.С. Исследование электрической прочности опорной изоляции выключателей серии ВНВ. – Электричество, 1978, № 10, с. 74–77.
4. Белодова И.П. и др. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2008, 249 с.
5. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеониздат, 1978, 223 с.
6. Ларионов В.П. Основы молниезащиты. М.: Знак, 1999, 103 с.
7. Ларионов В.П. Молниезащита. Часть 1. – Электричество, 1999, № 4, с. 51–58.

8. Syssoev V.S., Shcherbakov Yu.V. Electrical Strength of Ultra-Long Air Gaps, 2001, DOI:10.4271/2001-01-2898.

9. Gallimberti I., et al. Fundamental Processes in Long Air Gap Discharges. – C. R. Physique, 2002, No. 3, pp. 1335–1359.

10. Carrara G., Thione L. Switching surge strength of large air gaps: A physical approach. – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, No. 2, pp. 512–524, DOI:10.1109/T-PAS.1976.32131.

11. Carrara G., Pignini A., Thione L. Switching Impulse Insulation Strength of Multi-Electrode Air Gaps. Application of the «Leader Inception Approach» to the Determination of the Switching Impulse Strength of Multi-Electrode Air Insulation. – Colloquium CIGRE, 1975, 33–75(SC).

12. Горин Б.Н., Шкилев А.В. Развитие электрического разряда в длинных воздушных промежутках при импульсном напряжении положительной полярности. – Электричество, 1974, № 2, с. 29–38.

13. Волкова О.В., Корявин А.Р. К оценке минимальной электрической прочности длинных воздушных промежутков. – Электричество, 1980, № 3, с. 46–47.

14. Корявин А.Р. Минимальная электрическая прочность длинных воздушных промежутков с высоковольтным электродом различной формы. – Электротехника, 1983, № 4, с. 23–26.

[10.01.2022]



Авторы: **Корявин Алексей Родионович** – доктор техн. наук, главный научный сотрудник Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) – филиала ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), Москва, Россия.



**Волкова Ольга Владимировна** – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник ВЭИ – филиала РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия.

*Elektrichestvo*, 2022, No. 4, pp. 4–14

DOI:10.24160/0013-5380-2022-4-4-14

## Assessment of the Effect the Height and Relative Position of Support Insulation Components Have on the Insulation Electrical Strength

**KORYAVIN Aleksey R.** (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF named after academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Chief Scientific Officer; Dr. Sci. (Eng.).

**VOLKOVA Ol'ga V.** (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF named after academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Leading Researcher; Cand. Sci. (Eng.).

*The article presents the results from studies of the effect the height and relative position of extra high voltage class support insulation components have on the insulation electrical strength when subjected to positive polarity switching impulses, at which the insulation minimum permissible overall dimensions are determined. It is shown that the highest values of the insulation flashover voltage are achieved when a leader discharge develops along purely air trajectories: screen–pedestal or screen– plane. A similar result is obtained in the case of cascade flashovers from the screen over the column elements if the upper insulator structural height is significantly larger than that of the lower one. The reverse mutual arrangement of these insulators leads to a significant drop in the insulation flashover voltage during cascade flashovers. It is shown that at the final jump onset moment, the main contribution to the insulation flashover voltage value is introduced by the voltage drop across positive streamers, which is directly proportional to the length of these streamers. Hence it follows that the ambiguous effect of the height and mutual arrangement of the support insulation components on the insulation electrical strength during cascade flashovers is mainly due a significant difference in the lengths of the positive streamer zones at the final jump onset. With the upper insulator height equal to 2.7 m, the length of positive streamers at this moment is commensurable with the length of streamers when the flashover develops along purely air trajectories, whereas decreasing the upper insulator height by almost a half entails a significant decrease in the streamer lengths. Measures to eliminate undesirable cascade flashovers and ensure the highest electrical strength of support insulation are proposed.*

**Key words:** support insulation, cascade flashovers, electrical strength, positive polarity switching impulse

## REFERENCES

1. **GOST R 52034-2008.** *Izolyatory keramicheskie opornye na napryazhenie svyshe 1000 V. Obshchie tekhnicheskie usloviya* (Ceramic Support Insulators for Voltage over 1000 V. General Specifications). M.: Standartinform, 2009, 28 p.
2. **Aleksandrov G.N., Ivanov V.L.** *Izolyatsiya elektricheskikh apparatov vysokogo napryazheniya* (Insulation of High Voltage Electrical Devices). L.: Energoatomizdat, 1984, 208 p.
3. **Slutskin L.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1978, No. 10, pp. 74–77.
4. **Beloedova I.P., et al.** *Raschet elektricheskikh poley ustroystv vysokogo napryazheniya* (Calculation of Electric Fields of High Voltage Devices). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 249 p.
5. **Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I.** *Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity* (Physical and Engineering Fundamentals of Lightning Protection). L.: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
6. **Larionov V.P.** *Osnovy molniezashchity* (Basics of Lightning Protection). M.: Znack, 1999, 103 p.
7. **Larionov V.P.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1999, No. 4, pp. 51–58.
8. **Syssoev V.S., Shcherbakov Yu.V.** Electrical Strength of Ultra-Long Air Gaps, 2001, DOI:10.4271/2001-01-2898.
9. **Gallimberti I., et al.** Fundamental Processes in Long Air Gap Discharges. – C. R. Physique, 2002, No. 3, pp. 1335–1359.
10. **Carrara G., Thione L.** Switching surge strength of large air gaps: A physical approach. – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, No. 2, pp. 512–524, DOI:10.1109/T-PAS.1976.32131.
11. **Carrara G., Pigni A., Thione L.** Switching Impulse Insulation Strength of Multi-Electrode Air Gaps. Application of the «Leader Inception Approach» to the Determination of the Switching Impulse Strength of Multi-Electrode Air Insulation. – Colloquium CIGRE, 1975, 33–75(SC).
12. **Gorin B.N., Shkilev A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1974, No. 2, pp. 29–38.
13. **Volkova O.V., Koryavin A.R.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1980, No. 3, pp. 46–47.
14. **Koryavin A.R.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1983, No. 4, pp. 23–26.

[10.01.2022]